《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 11, Number 2, April 2000
(Journal of the Optical Society of Korea-Korean Edition)

헬륨 동위원소를 사용한 셀레늄증기레이저에서의 광이득과 출력특성에 관한 연구

최상태

경주대학교 컴퓨터전자공학부

(1999년 12월 14일 받음, 2000년 4월 17일 수정본 받음)

현재까지 62개의 레이저선이 발견된 셀레늄증기 다중광선레이저에서 일반적으로 사용하는 ^{4}He 대신에 동위원소인 ^{3}He을 펌핑가스로 최초로 사용하여 개개의 레이저선들에 대한 광이득과 레이저의 출력특성을 연구하였다. 대부분의 선들이 ^{4}He 방전보다 ^{3}He 방전에서 더 높은 output-coupling 출력과 소신호 이득을 보여 주었고, 특히 강력한 선들(497.6 nm, 499.3 nm, 506.9 nm, 517.6 nm, 522.8 nm, 530.5 nm)은 2배의 output-coupling출력과 25% 더 높은 소신호 이득을 보여 주었다.

I. 서 론

셀레늄증기 레이저는 서로 다른 파장을 가진 많은 수의 광선들을(현재까지 62개) 가시광영역과 적외선영역 내에서 방출하는 다중광선 레이저이다.[1-4] 가시광 영역에서 많은 수의 선들을 방출하므로 광학재료나 광학소자들의 특성을 검사할 수 있을 뿐만 아니라 스펙트럼분석기에서 파장의 눈금을 표시하는데 아주 적합하다. 화학처리공학에서는 복굴절필터를 장착한 셀레늄증기 다중광선레이저가 처리과정을 감독하는데 사용된다. 의학에서는 다중광선레이저를 사용하여 내시경의 진료능력을 높일 수 있으며, 또한 부차적인 정보를 얻을 수 있다(예를 들어, 파장이 559.1 nm인 빛은 정맥피를 통과할 때 강하게 흡수되고 574.8 nm의 빛은 동맥피를 통과할 때 특히 잘 흡수된다). 적, 청, 녹의 삼원색의 선택이 가능한 셀레늄증기 레이저[7]는 TV전송기술에서 고속으로 천연색사진을 주사하여 그것을 전자장치를 사용해서 저장하거나 재생할 때 특히 적합하다. 한 일본회사에 의해 개발된 He-Cd$^+$ 원통형 음극 레이저를 기초로 한 삼원색 레이저가 이 기술에 응용되고 있다.[8]

본 연구의 목적은 셀레늄증기 레이저에서 각각 ^{4}He와 ^{3}He을 충전가스로 사용했을 때 개개의 선들에 대한 레이저의 특성을 광이득과 출력의 측면에서 서로 비교 측정하는데 있다. 가스레이저인 He-Ne 레이저에서는 충전가스로 일반적으로 사용되는 ^{4}He 대신에 동위원소인 가벼운 ^{3}He을 사용했을 때 레이저 출력이 약 20% 정도 높아지는 것이 실험적으로 알려져 있다.[9] 같은 온도 내에서는 ^{3}He의 원자가 자신의 작은 원자질량으로 인해 ^{4}He보다 열적 속도가 상대적으로 높아지게 된다. 그로 인해 ^{3}He의 원자는 Ne 원자와 충돌이 더욱 잦아지고, 단위시간당 더 많은 에너지를 Ne 원자에 넘겨주게 되는데 기인한다. 이러한 효과는 He 방전을 여기원으로 사용하는 셀레늄증기레이저에서도 나타날 것으로 기대되고 있다.

개개의 선들에 대한 레이저 변수들은 서로 큰 차이를 보이기 때문에 레이저 전체출력을 측정하기 보다는 각 선들에 대한 개별적인 출력을 측정해야만 한다. 개개의 레이저선들을 선별하는데는 복굴절필터[5,6]를 사용하였다. 본 연구를 위해서 석영평판으로 구성된 레이저 방출창문을 공진기 내부에 설치하였고, 전체 시스템은 컴퓨터로 제어되는 측정장치를 사용하였다.

II. 셀레늄증기레이저의 원리와 구조

금속증기 레이저인 셀레늄증기 레이저의 능동매질로는 He 글로우방전을 사용한다. 여기서 He은 Se이온을 여기시키는데 펌핑가스로 작용한다. 음극으로부터 방출된 전자들은 전기장에 의해 양극 쪽으로 이동하고, He 원자들은 이 전자들과의 충돌로 인해 다음의 두 가지 반응식에 따라 이온화된다. 이때 전자들의 에너지는 He 원자로 넘겨진다.

$$e_{fast} + He \rightleftarrows He^+ + e + e \tag{1}$$

$$e + He \rightleftarrows He^*,\ He^* + e_{slow} \rightarrow He^+ \tag{2}$$

그림 1에서 보는 것과 같이 He 이온과 Se 원자사이의 전하교환의 과정을 거쳐 여기된 Se 이온이 생성된다.

$$He^+ + Se \rightarrow He + Se^+ \tag{3}$$

여기에너지는 Se 이온이 낮은 에너지준위로 천이할 때 레이저광선의 형태로 일부가 방출되고, 계속해서 진공자외선(VUV)의 상태로 여러 가지 파장의 광자를 방출한 후 Se 이온은 이온화의 기저상태에 도달한다. VUV 영역에서의 방출은 가시영역에서의 방출보다 더 높은 천이확률을 가진다. VUV 광선은 방전모세관의 내벽으로 흡수되고, Se 이온과 전자의 재결합이 이루어짐으로 인해 낮은 에너지준위는 빠른 속도로 비워진다. 이로써 높은 에너지준위가 낮은 에너지준위와 비교해서 더 큰 밀도로 점유되는 반전분포가 형성되고, Se 이온의 수많은 에너지준위가 여기되어질 수 있으므로 가시영역과 적외선영역에 걸쳐서 많은 선들을 방출하고 있다.

그림 2는 석영유리와 듀란유리 부분으로 이루어진 셀레늄증기레이저의 방전관을 보여준다. 유리관중심을 따라 위치한 석영유리모세관을 통과하여 양극과 음극사이에 He 방전이 일어난다. 모세관의 양극쪽 끝에 위치한 Se 오븐을 가열하면 증기형태의 Se이 방전내부로 확산된다. He 이온과의 전하교환충돌

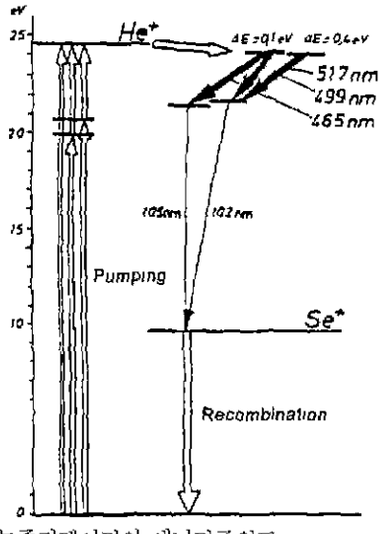

그림 1. 셀레늄증기레이저의 에너지준위도.

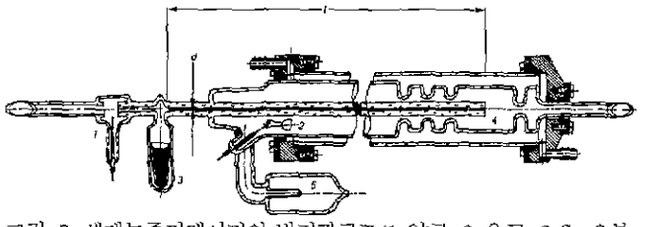

그림 2. 셀레늄증기레이저의 방전관구조(1:양극, 2:음극. 3:Se 오븐, 4:응결방, 5:He 탱크, $l=250$ mm : 유효모세관 길이, d = 1,5 mm : 모세관 직경)

로 생성된 증기형태의 Se 이온은 전기영동(cataphoresis)의 효과로 음극 쪽으로 이동하고 양광주의 길이를 따라서 균일한 분포를 이루는데, 이는 금속증기레이저의 동작에 중요한 점이다.

Se 이온이 음극에 직접 접촉하게 되면 화학작용으로 음극이 쉽게 손상되어 지고, Brewster창문에 응결하게 되면 레이저출력이 감소하거나 레이저의 방출이 중단된다. 이러한 이유 때문에 He 방전이 수냉식의 응결방을 통과하도록 하였고, 음극이 양극 쪽으로 완전히 치우쳐 위치하도록 제작하였다. 이러한 구조에 의해 Se 금속증기는 냉각된 응결방의 안쪽 표면에 달라붙게 되고, 레이저방전관을 냉각시킴으로써 뜨거운 석영유리벽을 통과하여 확산되는 He의 손실을 줄일 수 있다. 모세관 내에서는 가스방전이 상대적으로 높은 온도를 유지하기 때문에 모세관내벽에로의 Se의 응결은 형성되지 않는다.

III. 레이저의 output-coupling과 출력, 소신호 이득

본 연구에서는 공진기출력의 일부를 공진기내부에 설치된 석영평판에서 반사에 의해 output- coupling된 출력을 측정하였다. 석영평판의 반사율은 광축에 대한 각도에 따라 변화한다. 반사율 ρ_m^2의 계산에는 Fresnel 공식이 사용된다.

$$\rho_m^2=\left(\frac{n^2\cos\alpha_m-\sqrt{n^2-\sin^2\alpha_m}}{n^2\cos\alpha_m+\sqrt{n^2-\sin^2\alpha_m}}\right)^2 \tag{4}$$

위의 식은 굴절률이 n인 석영유리판 표면의 반사율을 입사면에 평행하게 진동하는 레이저광의 편광성분에 대하여 입사각 α_m의 함수로써 나타내고 있다. 그림 4의 측정장치에서 고정된 석영평판의 입사각 α_m은 레이저광의 반사손실을 최소화하기 위하여 각 선들에 대한 Brewster각에 근접한 54°로 정확히 고정시켰다.

반사율로부터 output-coupling율 a_m이 결정된다.

$$a_m=1-(1-\rho_m^2)^4 \tag{5}$$

식에서 지수 4는 광선이 석영평판을 왕복으로 통과할 때의 반사 횟수를 표시한다. 측정장치내의 회전하는 두개의 평판에 대해서도 동일하게 적용된다. 앞의 Fresnel 공식과 output-coupling율은 회전각의 위치에 따라 새로이 결정된다.

$$\rho_{var}^2=\left(\frac{n^2\cos\alpha_{var}-\sqrt{n^2-\sin^2\alpha_{var}}}{n^2\cos\alpha_{var}+\sqrt{n^2-\sin^2\alpha_{var}}}\right)^2 \tag{6}$$

$$a_{var}=1-(1-\rho_{var}^2)^8 \tag{7}$$

광경로 내의 2개의 회전평판에 의해 8개의 반사광이 나타나고 지수도 8이 된다. 고정된 석영평판에서의 공진기출력은 다음과 같이 주어진다.

$$P_R=\frac{P_m}{\rho_m^2}\quad (P_m=P_m\ f_c) \tag{8}$$

여기서 P_m'은 광검출기에서 읽어들인 출력이고 f_c는 광다이오드와 편광판의 손실에 대한 교정인자이다. 두개의 output-coupling율로부터 전체 output-coupling율 a가 주어지고 output-coupling출력 P가 결정된다.

$$a=(1-(1-\rho_m^2)^4\ (1-\rho_{var}^2)^8) \tag{9}$$

$$P_a=P_R\cdot a \tag{10}$$

레이저의 소신호 이득 g_0은 레이저빛이 사라지는 순간의 최대 output-coupling율 a_{max}과의 관계로부터 결정된다.

$$g_0=-\ln(1-a_{max}) \tag{11}$$

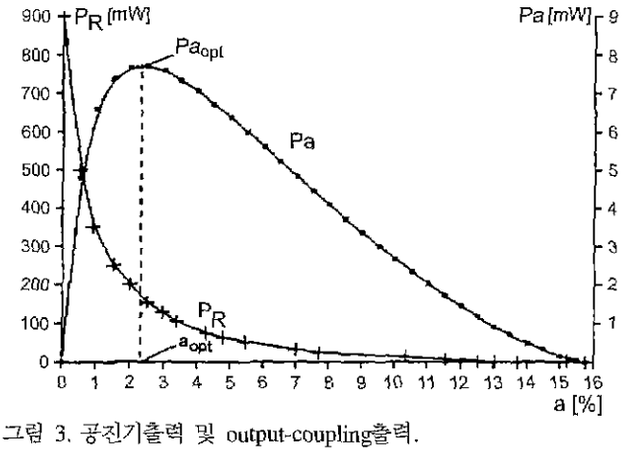

그림 3. 공진기출력 및 output-coupling출력.

공진기출력을 공진기 밖으로 output-coupling하기 위해서 공진기내부에 석영평판을 설치하였다. 광경로축에 대한 유리판의 각도에 따라 각각 다른 output-coupling을 a가 주어진다. 그림 3는 공진기출력 P_R과 output-coupling출력 P_α가 a의 함수로 나타나 있으며 이들의 관계를 설명하기 위한 하나의 예시이다. a가 0일 때 P_R은 최대이다. a가 증가함에 따라 P_R은 급격히 감소하며, 특정값 a_{opt}에서 최대로 가능한 출력값 $P_{a,opt}$이 주어진다. a가 계속해서 증가하면 P_α가 감소하고 P_R도 계속 감소한다. output-coupling율이 a_{max}에 이르러서는 P_R은 0이 되고 따라서 P_a도 0이 된다, 즉 레이저의 발진이 중단된다. 공진기출력은 레이저매질의 이득과 포화현상에 의해 생성되고, 공진기의 손실에 의해 한정된다. 손실이 최소로 유지될 때 레이저의 출력은 최고를 나타내며, 이 손실이 레이저의 능동매질을 통해서 보상되지 않으면 레이저의 발진은 불가능하다.

IV. 측정장치의 구조와 시스템

레이저출력의 output-coupling에 그림 4의 구조를 가진 측정장치가 만들어 졌다. 이것은 레이저방전관, 공진기거울, 석영유리판 그리고 복굴절필터 등으로 이루어졌다. 레이저방전관에서 방출되는 빛은 두 거울사이에서 왕복으로 반사되며, 레이저매질 내에서 증폭된다. 본 측정에서는 좁은 파장영역에서 높은 반사율을 가진 거울이 사용되었다.

첫 번째 석영평판은 광축에 대해 $\alpha_m = 54°$의 각도로 고정되어져서 레이저광의 일부를 output-coupling하는데 기여한다. 이 각은 개개의 파장에 대한 Brewster각에 아주 근접한 각도이다. 단지 이 평판에서 output-coupling된 레이저광만이 측정되었다. 3개의 유리판의 앞뒤 경계 면에서 반사에 의해 각각 2개의 광선으로 이루어진 출력들이 P_1에서 P_6까지 나타난다. 하나의 광선에 대한 측정값으로만 계산이 이루어지므로, output-coupling 평판의 뒷면으로부터 반사된 두 번째 광선은 조리개에 의해 차단된다. 측정기에 연결된 광다이오드를 통해서 output-coupling출력이 측정된다.

두 개의 회전평판들의 각도를 변화시킴으로써 output-coupling율을 변화시킬 수 있다. 이들은 서로 마주보는 반대방향으로 같은 각도로 회전함으로써 두개의 유리판에 의한 광경로차를 서로 보상한다. 그들의 회전위치에 따라 여러 다른 레이저출력이 output-coupling된다. 최초의 측정 시에는 이들은 각각의 파장에 따른 Brewster각에 위치하고 있다.

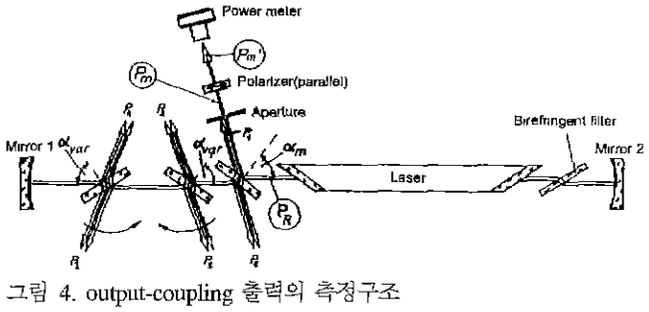

그림 4. output-coupling 출력의 측정구조

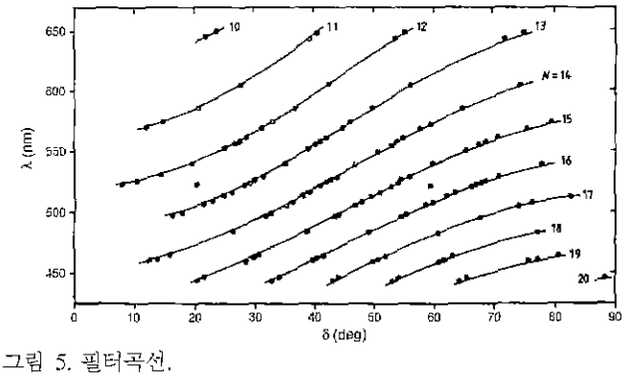

그림 5. 필터곡선.

일반적으로 레이저공진기 내에서는 여러 파장의 광선들이 동시에 진동한다. 단일 파장의 선을 선택하기 위해서 공진기 내부에 반사손실이 적은 복수한 복굴절필터를 설치하였다. 이것은 복굴절성질을 가진 결정질로 된 얇은 원판으로 이루어졌으며, 표면에 수직으로 광축의 주위로 회전이 가능하다. 0°와 180°의 위치에서는 모든 파장의 선들을 통과시키고, 다른 위치에서는 회전각도에 따라 하나 혹은 몇 개의 선들을 선택할 수 있다. 레이저광은 공진기를 왕복함으로써 복굴절필터를 두 번 통과한다. 이 필터는 광축에 대해서 Brewster각도로 기울어져 있으며, 광선의 편광이 필터 위의 입사평면과 일치하도록 되어 있다.

입사하는 레이저광선은 필터를 통과하면서 상광성과 이상광선으로 나누어지는데, 이들의 편광은 서로 직각을 이룬다. 두 개의 파는 서로 다른 굴절률로 인해서 필터의 반대쪽에서는 위상차가 생긴다. 그러므로 두개의 다른 편광은 필터의 반대쪽에서는 타원편광의 빛으로 합성된다. 그 결과 공진기내의 모든 Brewster면에서는 부차적인 반사손실이 생긴다. 필터의 반대쪽에서 두 파의 위상차가 2π의 정수배가 되면, 필터를 벗어날 때 그 파의 원래의 편광으로 되돌아간다. 이 경우에 필터는 공진기 내에서 손실을 야기시키지 않는다. 위상차는 광선의 파장과 두 파의 굴절률의 차이에 의해서 결정된다.

이 위상차는 크리스탈의 광축에 의존하기 때문에 필터표면에 수직으로 필터자체를 축주위로 회전시킴으로써 위상차를 변화시킬 수 있다. 고정된 위상차 $2\pi N$에 대해서는 필터의 통과파장의 곡선이 원판의 회전각 δ의 함수로써 주어진다. 필터를 사용해서 각각의 선들을 선택할 수 있다. 그림 5의 필터곡선을 보면 일정한 회전각 에서 여러 다른 차수 N의 곡선들이 좁은 간격으로 나타나므로 여러 개의 선들이 동시에 진동할 수 있다. 이것은 다른 두께의 필터들을 조합함으로써 해결할 수 있다. 그 외에도 필터표면에 대하여 광축을 더 기울게 함으로써 필터곡선의 경사도를 더 높일 수 있다. 본 연구에서는 독일의 Sprindler & Hoyer사가 제작한 두께 800 μm인 하나의 필터를 사용하였다. 실제로 525.3 nm의 측정에서 항상 522.8 nm의 선이 등시에 진동하였으나 전체적인 ^{3}He의 효과에 대한 측정에는 큰 영향을 주지 않으므로 두 선의 출력이 합쳐진 측정값을 525.3 nm의 값으로 하였다.

광다이오드 앞에는 편광판이 있다. 레이저는 공명기내에서 일반적으로 입사평면에 평행한 편광을 방출하지만, 입사면에

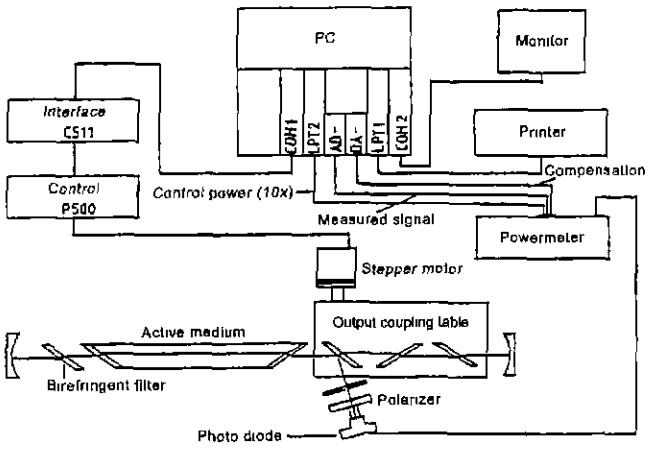

그림 6. 전체적인 측정시스템.

수직한 편광이 아주 일부이지만 생성될 수 있다. 특히 레이저광의 편광이 Brewster 창문의 입사면에 상대적으로 어긋날 때는 수직편광은 측정값을 아주 크게 틀리게 하므로, 이 성분은 차단되어야 한다. 컴퓨터로 제어되는 그림 6의 측정시스템에서, 광검출기에 연결된 출력측정기도 컴퓨터에 연결되어 있다. 공진기출력과 output-coupling출력의 계산을 위해서 측정치가 컴퓨터로 보내진다. 측정 중에는 모터의 제어로써 두개의 평판은 최초의 Brewster각에서 시작해서 0,02°씩 회전한다.

V. 측정결과와 결론

최대의 레이저 출력 하에서 측정이 이루어지기 위해서 먼저 레이저 변수들의 최적화가 필요하다. ^{4}He로 충전된 레이저방전관에서는 He 압력 P = 16 mbar, 방전전류 I = 290 mA 그리고 Se 오븐온도 T = 10.9 mv (오븐내의 열전소자의 전압으로 표시)로 최적화 시킨 후 선택된 모든 선들이 측정되었다. 그후 ^{4}He를 제거하고 대신 ^{3}He을 충전한 레이저방전관에서 최적화된 변수들의 값은 P = 19.5 mbar, I = 300 mA 그리고 T=10.4 mV 였으며, 복굴절필터에 의해 선택된 모든 선들을 측정하였다. 실험에 사용된 레이저방전관에는 길이 250 mm, 직경 1.5 mm의 소형의 모세관을 사용하였으므로 적외선영역의 선들과 가시영역의 선들의 일부는 발진하지 않았다.

선들의 파장 영역별로 최대출력을 나타내는 모두 4쌍의 공진기 거울을 사용하였다(청 : R = 0.8 m, 녹 : R = 1.5 m, 황 : R = 1.0 m, 적 : R = 0.8 m). 이들은 측정되는 선들에 대해서는 높은 반사율을 나타내며 다른 선들은 통과시킨다. 회전평판의 각도에 따라 출력측정기에서 읽은 측정값 P_m'으로부터 공진기출력 P_R, output-coupling출력 P_a 그리고 output-coupling율 a를 계산하였다. 이 측정을 위하여 특별히 개발된 software를 사용하여 위의 계산들과 모터제어를 통한 평판의 회전이 행해졌다.

^{4}He와 ^{3}He을 각각 사용한 셀레늄증기레이저에서 각 선들의 최대 output-coupling출력 $P_{a,opt}$은 최소 50 μW에서 최대 6 mW의 범위에서 발진하였으며, $P_{a,opt}$을 측정하여 개개의 선들에 대하여 ^{4}He 방전에 대한 ^{3}He 방전의 비율을 그림 7에 나타내었다. 또한 최대 output-coupling율 a_{max}를 바탕으로 한

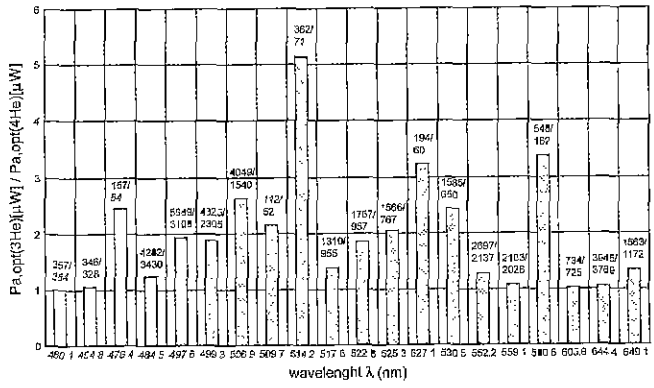

그림 7. 최대 output-coupling 출력 $P_{a,opt}$의 비교.

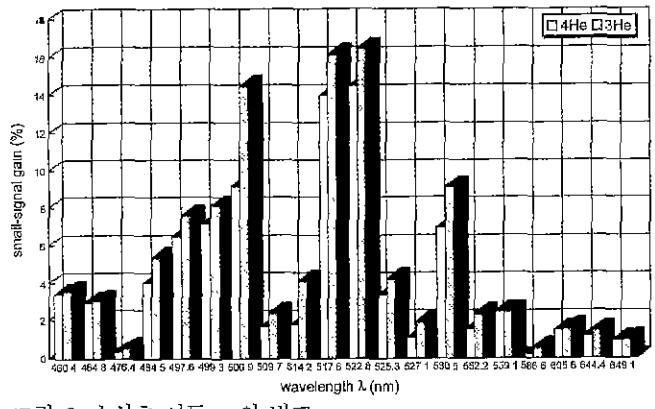

그림 8. 소신호 이득 g_o의 비교.

소신호 이득 g_0를 서로 비교한 결과를 그림 8로 나타내었다. 대부분의 선들이 3He 방전에서 더 높은 output-coupling출력과 소신호 이득을 보여 주었다. 특히 강력한 선들(497.6 nm, 499.3 nm, 506.9 nm, 517.6 nm, 522.8 nm, 530.5 nm)은 평균 2배의 $P_{a,opt}$ 값이 측정되었다. 이들 강력한 선들은 강도가 약한 선들 보다 ^{3}He 방전에서 소신호 이득의 증가가 현저하였고 평균 25% 더 높게 나타났다. 수 μW 단위의 약한 선들은 외부로부터의 아주 작은 영향에도 민감할 뿐만 아니라 출력증감수의 폭이 다양하므로, 이들에 대한 최대 output-coupling 출력과 소신호 이득의 비교는 강력한 선들에 비하여 신뢰도가 떨어진다고 볼 수 있다.

참고문헌

[1] G. Roll, J. Mentel, J. Phys. D: Appl. Phys. **22**, 483 (1989).
[2] W. T. Silfvast, M. B. Klein, Appl. Phys. Lett. **17**, 400 (1970).
[3] G. Roll, J. Mentel, Appl. Opt. **26**, 205 (1987).
[4] M. Neiger, H.-P. Popp, E. Schmidt, Appl. Phys. **22**, 488 (1989).
[5] F. Ortwein, J. Mentel, E. Schmidt, J. Phys. D, Appl. Phys. **22**, 488 (1989).
[6] J. Mentel, E. Schmidt, T. Mavrudis, Appl. Opt. **31**, 5022 (1992).
[7] E. Schmidt, J. Mentel, K.-H. Krahn, Appl. Opt. **25**, 1383

(1986).
[8] J. Mentel, Labor 2000, 206 (1989)
[9] G. Schiffner, Elektrooptik 1, Ruhr-Uni. Bochum, Lehrstuhl AEEO (1990/91).

A study on optical gain and output-coupling power of selenium vapour laser using isotope helium

Sang Tae Choi
School of Computer & Electronic Engineering, Kyongju University, Kyongju 780-210, Korea

(Received December 14, 1999, Revised manuscript received April 17, 2000)

The paper presents the effects of output-coupling power and small signal gain of a He-Se^+ laser by discharge of either ^{4}He or ^{3}He. A quartz plane-plate was installed to output-couple the laser beam from the resonator in the experimental setup. The result shows that compared with those of ^{4}He, the output-coupling power and small-signal gain of ^{3}He increase in the most of the lines. Especially, the small-signal gain of ^{3}He for the strong lines (497.6 nm, 499.3 nm, 506.9 nm, 517 6 nm, 522.8 nm, 530.5 nm) lies 25% higher than that of ^{4}He, and the output-coupling power doubles